

Discussion of Steam Loss Prediction Methods in the Development of Oil Sand with SAGD Technique

Zhiming Li 1, Pengfei Zhao, Yong Wang, Jing Wu

1 CNOOC Research Center, BeiJing, P.R.China

lizhm3@cnooc.com.cn

Abstract: SAGD technique is one of prospect method in situ to exploit oil sand in Alberta Canada that is the most important oil sand production area. This paper introduced the SAGD theory, production characterization in different stages and well pattern. The author analyzed the causes of steam loss in SAGD exploitation. Studied the principle of steam loss prediction and raise the classification standard of steam loss. Mud losses during the drilling of the horizontal sections of the wells, the mini troll pump test and "soaking" test with diesel in the horizontal section were tested in Athabasca L oil sand ore, analyzed the difference of the steam loss results between the above three predictions methods and actual production after regular operation. The method of mud losses during the drilling of the horizontal sections of the wells shows best match results between prediction and actual steam loss, whose cost of logging data is the lowest in these three methods. Finally, the paper discussed the possible reasons for the errors of the three methods.

Key words: Alberta; Oil Sand; SAGD; Steam Loss; Prediction Methods

SAGD 技术开发油砂中蒸汽损失量预测方法的探讨

李志明 1, 赵鹏飞 1, 王勇 1, 武静 1

¹ 中海油研究总院, 北京 邮编 100027

lizhm3@cnooc.com.cn

摘 要: SAGD 技术是世界主要油砂产区加拿大阿尔伯达油砂开采中发展前景广阔的一种钻井法开发油砂的技术。本文介绍了 SAGD 技术的工作机理、不同阶段的生产特征及布井方式, 分析了在 SAGD 开发中引起蒸汽损失的原因, 深入研究了预测蒸汽损失量的原理, 提出了蒸汽损失量大小的厘定标准。在 Athabasca L 油砂矿现场实验了水平段钻井泥浆漏失法、微循环注水法和水平段柴油浸泡法三种预测蒸汽损失量的方法, 对比分析了三种方法的预测结果与投产正常后实际的蒸汽损失量的差异, 指出钻井泥浆漏失量法预测结果与投产后正常生产的情况吻合程度最好, 其资料录取成本最低。最后讨论和分析了三种预测方法产生误差的可能原因。

关键词: 阿尔伯达; 油砂; SAGD 技术; 蒸汽损失; 预测方法

1 引言

油砂又称沥青砂或焦油砂, 包含有以下两种含义:

①石英等碎屑和其它造岩矿物中包含油的混合物; ②特指该种混和物中的原油, 当表示这种涵义时, 油砂和沥青砂等同, 在原始油藏条件下其粘度 $> 1.0 \times 10^4 \text{mPa}\cdot\text{s}$ 或相对密度 > 1.00 [1-3]、一般呈不流动的固态。

油砂作为非常规油气资源的主要构成部分, 近年来在全球烃类能源供应中所占的比例不断增大, 是未来油气资源的主要接替资源之一。世界主要油砂产区

位于加拿大阿尔伯达。2009 年阿尔伯达省生产原油 7.02 亿桶, 其中沥青油 5.29 亿桶, 折合平均日产沥青油 145 万桶。在沥青油产量中, 露天开发的约占 60%, 钻井法开发的约占 40%。至 2009 年底, 加拿大阿尔伯达最大的 Athabasca 油砂矿区和产区已投产的 24 个油砂项目中有 13 个采用钻井法中 SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage) 技术生产。随着可供露天法开采的油砂储量越来越少, 钻井法动用的油砂储量将会越来越多, SAGD 应用的油砂项目将会越来越广。

影响 SAGD 技术开发油砂项目经济性和可行性的关键因素是蒸汽效率, 衡量蒸汽效率的一个主要指标

是蒸汽注入到沥青油藏中的损失量，因此预测蒸汽损失量对 SGAD 技术开发油砂项目具有重要意义。

目前预测蒸汽损失量的方法处于摸索阶段，本文以加拿大阿尔伯达 Athabasca 矿区 L 油砂矿为例，在第一批开发井钻完后未投产前采用三种不同方法预测注汽投产后蒸汽损失量，预测结果与投产正常后开发井的蒸汽损失量进行了对比分析。

2 SAGD 开发技术介绍

SAGD 驱油机理是对于在原始油藏条件下无流动能力的沥青，通过向沥青油藏注高温蒸汽，加热沥青使其粘度降低、变为可流动的原油；在经历油藏预热阶段后，在注采井对间形成热连通，注入的蒸汽向上垂向扩散在沥青油藏中形成蒸汽腔，蒸汽腔向上及侧面扩散，与沥青油藏中沥青发生热交换，粘度降低变为可流动的原油和蒸汽冷凝水、油藏水流入采油井筒中[4]（图 1）。随着注汽的进行，蒸汽腔不断发育，其历程分为三个阶段：早期、中期、晚期，对应的三个生产阶段为：早期-产能上升和稳产阶段、中期-产能加速下降阶段、晚期-产能减速下降阶段（图 2）。

SAGD 主要布井方式为双水平井布井方式，即注采水平井对（图 4），在靠近油藏底部钻一对上下平行的水平井，上面水平井注汽，下面水平井采油，水平井对的垂直距离约 5m，水平采油井与油藏底部垂直距离约 3m，蒸汽腔平面波及半径约 50m（图 3）。

SAGD 开采油砂的优点有成本相对较低，单井产能高，采油速度快，稳产期较长，采收率相对较高（40%-60%），对环境的破坏相对较小。

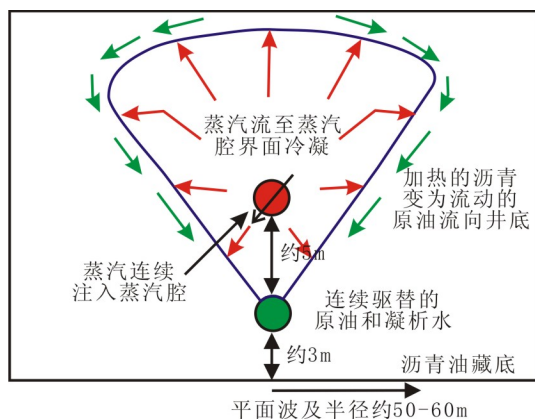


Figure 1. Oil displacement mechanism of SGAD (modification from reference 4)

图 1 SAGD 技术驱替机理图（根据文献 4 修改）

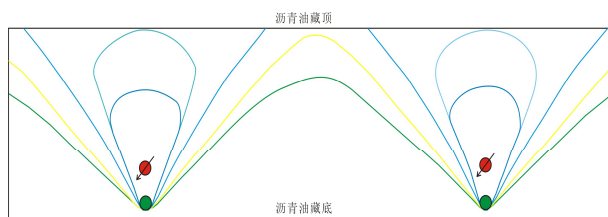


Figure 2a. Steam chamber developing sketch map with elapsed time in the SAGD regular production

图 2a SAGD 正常投产下蒸汽腔随注入时间的发育示意图

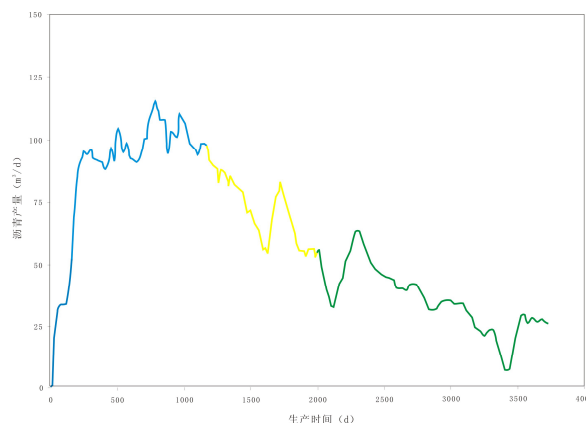


Figure 2b. The production curve corresponding to steam chambers development stages in SGAD regular operation

图 2b SAGD 正常投产下不同蒸汽腔发育阶段对应的不同生产阶段曲线

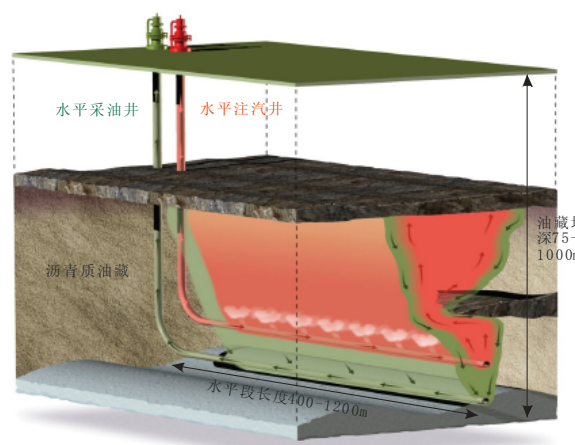


Figure 3. Sketch map of SAGD injector and producer horizontal well pairs

图 3 SAGD 水平井对布井示意图

3 注入蒸汽损失量的预测方法

采用了三种方法预测蒸汽损失量，分别是水平段钻井泥浆漏失量法、微循环注水法和柴油浸泡法。

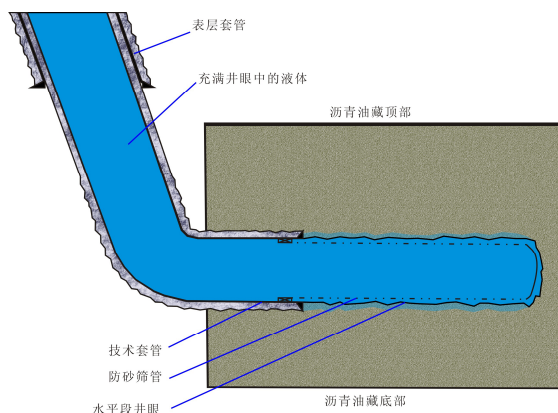


Figure 4a. The theory of prediction of "Low" fluid loss

图 4a “低”的流体损失标准预测原理图

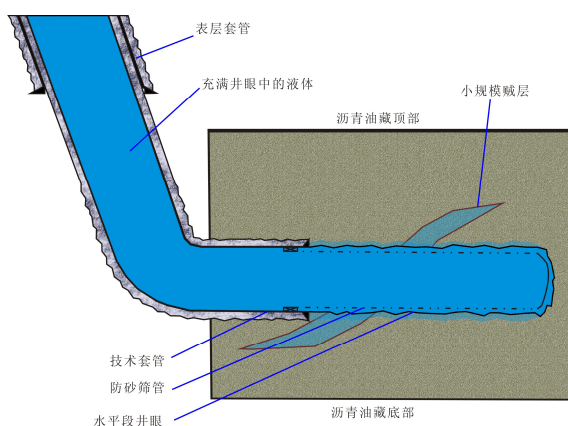


Figure 4b. The theory of prediction of "Medium" fluid loss

图 4b “中”的流体损失标准预测原理图

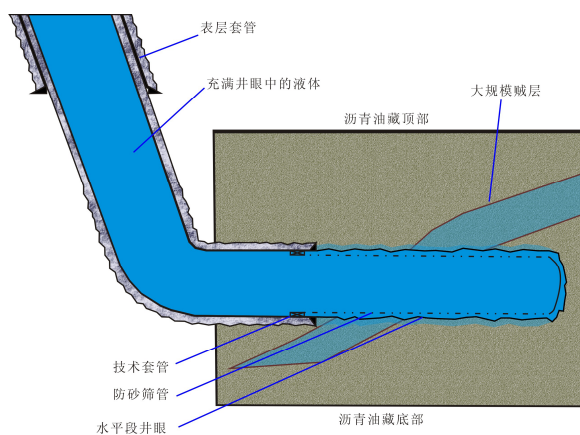


Figure 4c. The theory of prediction of "High" fluid loss

图 4c “高”的流体损失标准预测原理图

高温蒸汽、泥浆、水、柴油等流体损失的原因是当沥青油藏存在高渗透的贼层（包括水层、低饱和油层、气层，位置可位于油藏的底部、中间或顶部），流体沿着高渗透贼层突进并迅速逸散而造成流体的

损失。

预测蒸汽损失量的原理是当沥青油藏中不存在贼层时（图 4a），在原始沥青油藏条件下，充填在砂岩中几乎呈不流动的固态沥青和石英等碎屑矿物及粘土等其它造岩矿物组成了低渗屏障，泥浆、水、柴油等液相流体在沥青油藏中流动困难，在此种情况下注入蒸汽的损失量小，水平段钻井过程中泥浆漏失量较小，微循环注水测试中压力值升高大（图 5a）；柴油浸泡测试中柴油返回的百分比高、损失的百分比较小。当沥青油藏中存在一定规模的高渗贼层时（图 4b），泥浆、水、柴油等液相流体沿着贼层突进，在此种情况下注入蒸汽有一定损失量，水平段钻井过程中泥浆漏失量中等，微循环注水测试中压力有一定程度升高（图 5b），柴油浸泡测试中柴油有一定的损失。当沥青油藏中存在大规模的高渗贼层时（图 4c），泥浆、水、柴油等液相流体沿着贼层大规模突进，在此种情况下注入蒸汽损失量大，水平段钻井过程中泥浆漏失高，微循环注水测试中压力升高小（图 5c），柴油浸泡测试中柴油损失量大。

流体损失高、中、低的标准是结合有少部分水平开发井对临近的静态贼层情况（根据临近油砂评价直井所钻遇的贼层确定）和三种预测方法的动态反应特征综合确定。如果水平井对周围没钻遇贼层且三种方法反映流体侵入水平井眼周围的范围小，在此种情况下认为流体损失量低。如果水平井对周围钻遇贼层的厚度在 0-3 米之间且三种方法反映流体侵入水平井眼周围的范围中等，在此种情况下认为流体损失量中等。如果水平井对周围钻遇贼层的厚度大于 3 米且三种方法反映流体侵入水平井眼周围的范围大，在此种情况下认为流体损失量高。

记录的 49 个水平井对水平段钻井泥浆漏失量在 2.7 m³ (L6P1) 至 160.7m³ (L2P1) 之间。在水平段钻井泥浆漏失量法中“低”的流体漏失量标准是泥浆漏失量小于 20m³，“中”的流体漏失量标准是泥浆漏失量在 20 m³ 至 30m³ 之间，“高”的流体漏失量标准是泥浆漏失量大于 30m³。

在微循环注水测试中通过向井眼注入 10 m³ 的清水，记录井中压力的变化来预测流体的漏失情况。在微循环注水测试法中“低”的流体漏失量标准是井中压力的升高值大于 900 kPa，“中”的流体漏失量标准是井中压力的升高值在 450 kPa 至 900 kPa，“高”的流体漏失量标准是井中压力的升高值小于 450 kPa。

在柴油浸泡法中，根据注入井眼中的柴油量和返

回的柴油量的差值与注入井眼中柴油量比值预测流体的损失量。“低”的流体漏失量标准是柴油损失的百分比小于 50%，“中”的流体漏失量标准是柴油损失的百分比在 50%-80%之间，“高”的流体漏失量标准是柴油损失的百分比大于 80%。

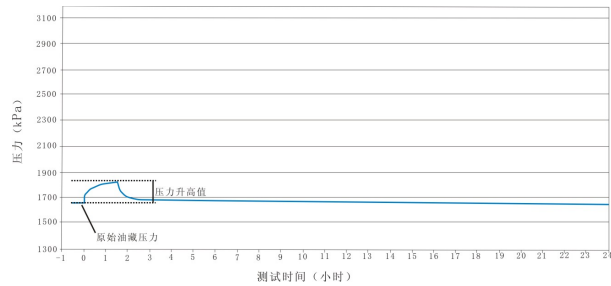


Figure 5a. Pressure vs. Elapsed Time for L2P1
图 5a L2Pair1 井对测试压力随时间变化曲线图

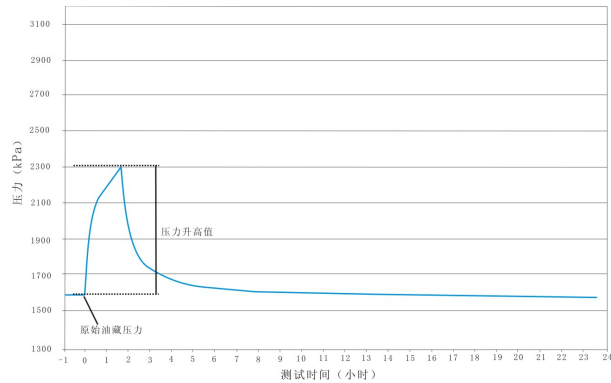


Figure 5b. Pressure vs. Elapsed Time for L2P5
图 5b L2Pair5 井对测试压力随时间变化曲线图

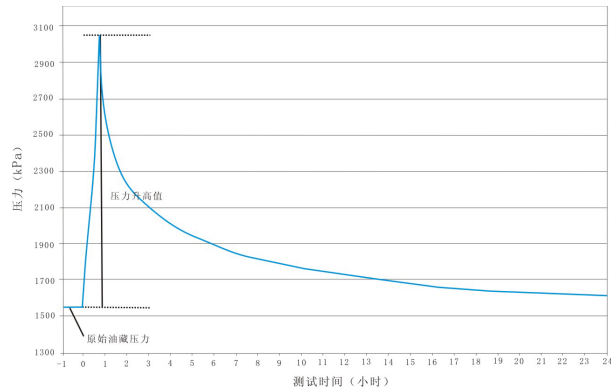


Figure 5c. Pressure vs. Elapsed Time for L2P8
图 5c L2Pair8 井对测试压力随时间变化曲线图

4 结果和讨论

通过水平段钻井泥浆漏失法预测的 49 口水平生产井中蒸汽损失高的有 9 口，蒸汽损失中等的有 13

口，蒸汽损失低的有 27 口。通过微循环注水法预测的 30 口水平生产井中蒸汽损失高的有 10 口，蒸汽损失中等的有 9 口，蒸汽损失低的有 11 口。通过水平段柴油浸泡法泥浆漏失法预测的 42 口水平生产井中蒸汽损失高的有 10 口，蒸汽损失中等的有 15 口，蒸汽损失低的有 17 口（表 1）。

Table 1. The statistical results between prediction and actual production

表 1 蒸汽损失量预测结果与投产正常生产后实际损失量统计对比表

序号	水平井对名	SAGD正常投产前预测结果						SAGD正常投产后实际蒸汽损失
		水平段泥浆漏失法		微循环测试法		柴油浸泡法		
		漏失量 (m³)	漏失级别	压力升高值 (kPa)	漏失级别	柴油漏失量 (%)	漏失级别	产注比 (%)
1	L2P1	57.0	高	167	高	87	高	0.77
2	L2P2	40.6	高	272	高	82	高	0.57
3	L2P3	34.6	高	142	高	44	低	0.48
4	L2P4	51.1	高	312	高			0.73
5	L2P5	26.7	中	706	中	49	低	0.88
6	L2P6	9.4	低	873	中			0.85
7	L3P1	19.2	低			46	低	0.87
8	L3P2	20.0	低			58	中	0.85
9	L3P3	29.4	中					0.74
10	L3P4	13.7	低			55	中	0.88
11	L3P5	160.7	高			46	低	0.53
12	L5P1	8.7	低	680	中	45	低	0.85
13	L5P2	19.4	低	1334	低	48	低	0.9
14	L5P3	15.8	低	1050	低	75	中	0.9
15	L5P4	14.5	低	1100	低			0.78
16	L5P5	20.1	中			50	中	0.61
17	L6P1	2.7	低	668	中	42	低	0.61
18	L6P2	19.1	低	935	低	40	低	0.81
19	L6P3			247	高			0.51
20	L6P4	11.3	低	432	高	68	中	0.79
21	L6P5			578	中	69	中	0.65
22	L6P6	20.0	中			54	中	0.73
23	L6P7	36.4	高					0.5
24	L6P8	29.0	中			100	高	0.55
25	L6P9	32.3	高			100	高	0.42
26	L6P13	16.5	低			58	中	0.75
27	L7P1	11.1	低	1323	低	33	低	0.73
28	L7P2	11.5	低	1340	低	35	低	0.83
29	L7P3	11.4	低	700	中			0.83
30	L7P4	12.8	低	650	中	56	中	0.65
31	L7P5	15.0	低	1100	低			0.76
32	L7P6	123.0	高	134	高	100	高	0.53
33	L7P7	20.2	中	884	中	58	中	0.36
34	L7P8	26.3	中	402	高	71	中	0.66
35	L7P9	26.3	中	340	低	57	中	0.68
36	L8P1	15.2	低	884	高	100	高	0.79
37	L8P2	29.6	中	252	高	80	高	0.72
38	L8P3	22.9	中	1350	低	22	低	0.72
39	L8P4	9.5	低	770	中	44	低	0.8
40	L8P5	9.0	低	1062	低	43	低	0.85
41	L8P6	14.3	低	1373	低			0.75
42	L9P1	11.5	低			67	中	1
43	L9P2	4.8	低			24	低	0.95
44	L9P3	6.7	低			35	低	0.9
45	L9P4	5.8	低			78	中	0.48
46	L9P5	15.7	低			45	低	0.91
47	L10P1	14.3	低			35	低	0.76
48	L10P2	22.7	中					0.6
49	L10P3	21.0	中			52	中	0.72
50	L10P6	23.6	中			100	高	0.83
51	L10P8	42.8	高			91	高	0.25
52	L10P10					93	高	0.3
颜色填充标注说明		不吻合		相对吻合		吻合		

SAGD 正常投产一段时间后根据水平井对产出的水量（已排除沥青油藏内部自由水影响）与注入蒸汽量（汽化前的水量）比值即产注比来验证三种方法的准确性。根据矿场经验，如果产注比在 0.75-1 之间，认为蒸汽损失量低。如果产注比在 0.6-0.75 之间，认为蒸汽损失量中等。如果产注比小于 0.6，认为蒸汽损失量高。从表 2 看出泥浆漏失法预测结果的吻合程度

最高，同时这种方法可以要求在钻井过程中详细记录泥浆漏失情况，其成本最低。

Table 2. The match results of the three methods

表 2 三种预测方法结果与投产正常生产后实际损失量吻合程度统计表

	水平段泥 浆漏失法	微循环测 试法	柴油浸泡 法
不吻合 (%)	6%	13%	19%
相对吻合 (%)	14%	37%	22%
吻合 (%)	80%	50%	59%

这三种方法预测蒸汽损失量存在一定误差，可能与以下两种因素有关：①L 油砂矿地下复杂的地质条件有关，如发育广泛而不稳定的隔夹层（泥岩、页岩、IHS 层、砾岩层等）。②与三种方法探测的半径有关，三种方法中由于泥浆密度最大，探测的范围相对最大，但与 SAGD 正常生产一段时间后蒸汽腔波及范围相比，还存在一定差距。

5 结论

(1) 预测 SAGD 技术开发油砂中蒸汽损失量的方法有

三种：水平段钻井泥浆漏失量法、微循环注水法和柴油浸泡法，其中水平段钻井泥浆漏失量法预测结果与投产后正常生产的情况吻合程度最好、其资料录取成本最低；

(2) 三种方法预测的结果存在一定误差的原因可能与 L 油砂矿复杂的地下地质条件和其探测范围有关。

References (参考文献)

- [1] Jia Chengzao, Liu Xijian, Lei Qun. Oil Sands and Evaluation Methods of Reserves.. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 1-35.
- [2] Ardine D. Fuel of the future: Cretaceous oil sand of western-Canada. Canadian Society of Petroleum Geologists, 1974 (3): 50-67.
- [3] Kramers J W, Mossop G D. Geology and development of the Athabasca oil sand deposit. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1987, 69: 92-99.
- [4] Butler, R. M. , Yee, C. T. Progress in the insitu reecovery of heavy oil sand bitumen[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, 41 (1) : 18 - 29.